

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Во многих случаях практики, в целях уменьшения средней мощности источника энергии, становится необходимым импульсный режим питания. Например, в отечественной и зарубежной практике эксперименты по управляемым термоядерным реакциям проводятся главным образом в импульсном режиме. Ускорители заряженных частиц на большие энергии, дуговые аэродинамические трубы для испытания моделей управляемых снарядов и космических летательных аппаратов и некоторые другие установки также работают в импульсном режиме [1, 2].

При работе в импульсном режиме обычно требуется очень большая энергия, которая, как правило, накапливается в соответствующем накопителе в течение длительного времени, измеряемого секундами, и затем за короткий промежуток времени, измеряемый микросекундами или долями секунды, разряжается в нагрузку.

Известно, что энергия может быть запасена в виде электрического заряда в конденсаторах, магнитного потока в индуктивностях, механической энергии в электрических машинах и химической энергии в аккумуляторах и др. Эти различные формы накопления энергии, как правило, не исключают, а дополняют друг друга. Например, запасание энергии в конденсаторах наиболее целесообразно в тех случаях, когда время разряда измеряется микросекундами, а величина накопленной энергии не превышает 1 Мдж. Магнитное накопление становится оправданным при энергиях свыше 1 Мдж и при отдаче энергии в течение миллисекунд. Электромашинное накопление может быть применено при очень широком диапазоне энергий при времени разряда от сотых долей секунды до нескольких секунд.

Наиболее выгодным, с точки зрения минимальных потерь, является накопление энергии в конденсаторах. Однако, с другой стороны, электрический метод накопления является самым дорогим и громоздким, поскольку стоимость конденсаторов высока, а плотность энергии в них составляет всего 0,02—0,3 дж/см³. Энергия, запасенная в электрическом поле на единицу объема конденсатора в дж/см³, равна:

$$q_E = 4,44 \cdot 10^{-14} \epsilon E^2, \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость,

E — напряженность электрического поля в в/см.

В табл. 1 приведены данные плотности энергии в конденсаторах с различными диэлектриками.

Таблица 1

Диэлектрик	ϵ	E в/см	q_E дж/см ³
Бумага, пропитанная в масле	3—6	до 10^6	0,13—0,26
Двуокись титана	~ 90	$7,5 \cdot 10^4$	$\sim 0,02$
Титанат бария	~ 3000	$2,5 \cdot 10^4$	$\sim 0,08$

В безжелезных индуктивных накопителях плотность энергии определяется уравнением (2).

$$q_L = \frac{k}{2} \frac{1}{\mu_0} B^2, \quad (2)$$

или $q_L = 0,398 k B^2, \quad (2a)$

где q_L — запас энергии на единицу объема, замкнутого витками катушки в дж/см³;

μ_0 — магнитная проницаемость воздуха;

B — магнитная индукция в тл;

k — коэффициент учитывающий геометрию катушки: $k = f\left(\frac{l}{D}\right)$,

при $\frac{l}{D} \geq 10$ $k = 1$, при $\frac{l}{D} = 1,5$ $k = 0,25$;

D — средний диаметр катушки;

l — высота катушки.

Практически приемлемые значения индукции в безжелезных индуктивных накопителях могут находиться в пределах $B = 0,5 \div 10$ тесла, при этом плотность энергии в них, в соответствии с уравнением (2a), будет изменяться от 0,1 до 40 дж/см³. В известных индуктивных накопителях плотность энергии изменяется в меньших пределах, например, в катушке индуктивности Мичиганского университета, имеющей наружный и внутренний диаметр соответственно 3 и 1,5 м и высоту 0,9 м, выполненной из 220 витков алюминиевого 169 жильного кабеля и рассчитанной для накопления энергии в 1 Мдж, плотность энергии составляет 0,3 дж/см³ [3]. В катушке индуктивности, рассчитанной для накопления энергии 100 Мдж при мощности источника 10 тыс. квт, плотность энергии составляет 1,6 дж/см³ [2]. Однако индуктивные накопители имеют ряд недостатков, из которых наиболее важными являются малая экономичность из-за больших потерь энергии, сложность коммутации запасенной энергии и необходимость мощных источников питания накопителя.

Накопление энергии во вращающихся маховых массах является наиболее эффективным, вращающиеся роторы электрических машин предельных габаритов способны запастись энергией свыше 1000 Мдж, однако, в этом случае имеются трудности, связанные с отбором энергии в нагрузку.

Преобразование энергии вращающихся маховых масс в электромагнитную энергию осуществляется как с помощью стандартных, так и с помощью специальных электрических машин, таких, как ударные генераторы, униполярные генераторы и т. д., при этом возможности специальных машин как с точки зрения конструктивных особенностей,

так и с точки зрения способов коммутации до сих пор исчерпаны не полностью.

Рассмотрим возможности генератора ударной мощности — однофазной синхронной машины типа турбогенератора — в отношении удельной кинетической энергии, запасаемой вращающимся ротором, и той ее части, которая преобразуется в электромагнитную энергию статора. При внезапном коротком замыкании ударного генератора на период одной максимальной полуволны тока электромагнитная энергия, получаемая в статоре из запасенной в роторе кинетической энергии, будет [4]

$$Q = \frac{P_{уд}}{\omega} = \frac{D^2 l n}{\omega C_{уд}}; \quad (3)$$

где $C_{уд}$ — машинная постоянная ударного генератора.

Для однофазного генератора величина $C_{уд}$, с достаточной степенью точности, может быть определена

$$C_{уд} = 0,38 x_{уд} C_A; \quad (4)$$

где C_A — машинная постоянная генератора нормального исполнения; $x_{уд}$ — индуктивное сопротивление ударного генератора.

Для предварительного выбора величины $x_{уд}$ можно пользоваться следующим соотношением:

$$x_{уд} \approx 1,15 x_S,$$

где x_S — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

В существующих генераторах ударной и разрывной мощности величина $x_{уд}$, выраженная в относительных единицах, обычно находится в пределах: $x_{уд} = 0,02 \div 0,05$.

Машинная постоянная ударного генератора для машины в габаритах турбогенераторов на мощности от 20 до 200 Мвт без учета форсировки возбуждения колеблется в пределах

$$C_{уд} = (0,7 \div 1,2) x_{уд} \text{ см}^3/\text{дж},$$

причем меньшие значения относятся к машинам больших мощностей. Электромагнитная энергия ударного генератора на единицу объема ротора q_p и соответственно на единицу объема всей активной части машины q_a будет равна:

$$q_p = \frac{2}{\pi^2 C_{уд} C_1} \approx \frac{0,5}{x_{уд} C_A C_1}; \quad (5)$$

$$q_a = \frac{2}{\pi^2 C_{уд} C_2} \approx \frac{0,5}{x_{уд} C_A C_2}; \quad (5a)$$

где

$$C_1 = \left(\frac{D_p}{D} \right)^2, \quad C_2 = \left(\frac{D_a}{D} \right)^2,$$

D_p — диаметр ротора,

D — диаметр расточки статора,

D_a — внешний диаметр статора.

При внезапном замыкании ударного генератора на индуктивную нагрузку x_n в электромагнитную энергию статора и нагрузки перейдет меньшая часть кинетической энергии ротора, чем при коротком замыкании. Это уменьшение можно учесть коэффициентом $k_{эм}$.

$$Q_{эм} = P_{уд} \frac{k_{эм}}{\omega} = \frac{D^2 l n}{C_{уд}} \frac{k_{эм}}{\omega}, \quad (6)$$

где

$$k_{эм} = \frac{x_{уд}}{x_{уд} + x_n} \left(\frac{k_{зн}}{k_3} \right)^2,$$

k_3 — коэффициент затухания тока при коротком замыкании,

$k_{зн}$ — коэффициент затухания тока при нагрузке.

В соответствии с этим, электромагнитная энергия на единицу объема ротора $q_{рн}$ и на единицу объема всей активной части машины $q_{ан}$ при нагрузке будет

$$q_{рн} = \frac{2k_{эм}}{\pi^2 C_{уд} C_1}, \quad q_{ан} = \frac{2k_{эм}}{\pi^2 C_{уд} C_2}. \quad (7)$$

Из уравнений (5) и (7) следует, что удельная электромагнитная энергия, получаемая в статоре из кинетической энергии вращающегося ротора, зависит в основном от реактивных сопротивлений генератора и нагрузки и от величин, определяющих машинную постоянную C_A генератора, в габаритах которого выполнен ударный генератор.

Так как с изменением числа полюсов коэффициент C_1 изменяется незначительно, а коэффициент C_2 заметно уменьшается с увеличением числа полюсов, то при одинаковых значениях $x_{уд}$ и C_A для быстроходных (б) и тихоходных (т) машин получим следующие соотношения между их удельными электромагнитными энергиями:

$$\frac{q_{рт}}{q_{рб}} = \frac{(x_{уд} C_A C_1)_б}{(x_{уд} C_A C_1)_т} \approx 1, \quad (8)$$

$$\frac{q_{ат}}{q_{аб}} = \frac{(x_{уд} C_A C_2)_б}{(x_{уд} C_A C_2)_т} > 1. \quad (9)$$

В табл. 2 приведены значения удельных электромагнитных энергий q_p и q_a в зависимости от индуктивного сопротивления $x_{уд}$ для двухполюсных машин предельных габаритов ($C_A = 1,8 \text{ см}^3/\text{дж}$) с усредненными величинами коэффициентов: $C_1 = 0,94$ и $C_2 = 3,2$.

Таблица 2

$x_{уд} \text{ д/е}$	0,05	0,04	0,03	0,02
$q_p \text{ дж/см}^3$	6,3	7,9	10,5	15,7
$q_a \text{ дж/см}^3$	1,8	2,3	3,1	4,6

Для суждения об эффективности механического накопления определим, какая часть запасенной кинетической энергии вращающегося ротора переходит за время одного импульса в электромагнитную энергию.

Кинетическая энергия ротора, имеющего момент инерции I и вращающегося со скоростью ω , равна

$$T = I \frac{\omega^2}{2}, \quad (10)$$

где

$$I = \Sigma m r^2 = \frac{1}{8} M D_p^2, \quad M = \gamma l \frac{\pi D_p^2}{4}.$$

Кинетическая энергия на единицу объема ротора

$$\Delta T = \frac{T}{V_p} = \frac{1}{16} \gamma \left(\frac{2\pi f}{p} \right)^2 D_p^3. \quad (11)$$

Для значений $\gamma = 7800 \text{ кг/м}^3$ и $f = 50 \text{ гц}$, получим

$$\Delta T = 48,1 \left(\frac{D_p}{p} \right)^2 \text{ дж/см}^3,$$

где D_p — диаметр ротора в метрах,
 p — число пар полюсов.

Значения плотности кинетической энергии для различных диаметров двухполюсных роторов, вращающихся со скоростью 50 об/сек, приведены в табл. 3.

Таблица 3

$D_p \text{ м}$	0,5	0,8	1	1,1	1,2	1,3
$\Delta T \text{ дж/см}^3$	12,0	30,8	48,1	58,1	69,3	81,2

Соотношение между q_p и ΔT показывает меру использования объема машины. Назовем отношение q_p к ΔT коэффициентом использования машины

$$\eta_m = \frac{q_p}{\Delta T} \cdot 100\%.$$

Значения коэффициентов использования для ряда генераторов ударной и разрывной мощности приведены в табл. 4.

Таблица 4

Тип	Габаритная мощность ква	$D_p \text{ м}$	$x_{уд} \text{ д/е}$	$q_p \text{ дж/см}^3$	$\Delta T \text{ дж/см}^3$	$\eta_m \%$
ТИ—2,5—2	3125	0,570	0,068	3,09	15,6	19,8
ТИ—12—2	15000	0,820	0,027	7,80	32,3	24,1
ТО—12—2	15000	0,825	0,045	4,67	32,7	14,3
ТИ—75—2	83000	1,040	0,043	4,80	52,0	9,30
ТИ—100—2	125000	1,150	0,020	10,5	63,5	16,5

Из табл. 4 следует, что при внезапном коротком замыкании рассмотренных ударных генераторов от 9 до 25% кинетической энергии вращающегося ротора переходит за время одного импульса в электромагнитную энергию статора. При внезапном замыкании на нагрузку значения η_m будут уменьшены в соответствии с величиной коэффициента $k_{эм}$. Наличие маховика на валу ротора также будет сказываться только на величине η_m . Чем больше будут дополнительные маховые массы, тем меньше будет коэффициент использования.

Из уравнения (11) следует, что при условии одинаковой окружной скорости ($\frac{D_p}{p} = \text{const}$) удельная кинетическая энергия вращающегося ротора не зависит от числа полюсов машины. Однако, поскольку роторы многополюсных машин большой мощности выполняются шихтован-

ными, то допускаемые предельные окружные скорости в них приходится снижать до значений, составляющих примерно 75% от предельных окружных скоростей цельнокованных роторов. Поэтому плотность кинетической энергии у многополюсных машин в общем случае меньше, чем у двухполюсных. Но полный запас кинетической энергии в многополюсных машинах может быть получен больше, чем в двухполюсных. В этом отношении следует рассмотреть возможности 4, 6 и 8-полюсных машин, при этом особый интерес представляют четырехполюсные машины, ротора которых могут быть выполнены цельнокованными.

При современном уровне развития металлургической промышленности, из условия допустимых механических напряжений, ротор двухполюсного генератора может быть выполнен с предельным диаметром около 1,2 м, а четырехполюсного — около 2 м. Следует отметить, что ударный генератор, как правило, приводится во вращение от асинхронного двигателя, поэтому его скорость не может превысить синхронную и коэффициент угонной скорости не может быть больше единицы.

В табл. 5 приведены значения удельной энергии и полного запаса кинетической энергии для двухполюсных и четырехполюсных генераторов ударной мощности, выполненных в предельных габаритах.

Таблица 5

Число полюсов	D_p м	l м	ΔT дж/см ³	T мегадж
2	1,2	8	69,3	625
4	2,0	8	48,1	1210

Если допустить, что около 10% запасенной кинетической энергии ротора переходит в электромагнитную, то в этом случае от четырехполюсного ударного генератора предельных габаритов может быть получена энергия свыше 100 Мдж.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Curruthers. Proc. Inst. Electr. Eng., A 106 S № 2 166—172, 1959.
2. Г. М. Гончаренко, Л. П. Побережный, И. П. Верещагин. Труды МЭИ, Электроэнергетика, вып. 45, 1963.
3. H. C. Early, R. C. Walker. Communication and Electronics, т. 31, 1957.
4. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Мощность, энергия и машинная постоянная ударного генератора. Известия ТПИ, т. 132, 1964.